6.1　定積分の定義

関数の定積分を定義する.

実数 $a_1, a_2, a_3, \ldots, a_n$ の中で最も大きい実数を次のように書き表す：

$$\max\{a_1, a_2, a_3, \ldots, a_n\} \ .$$

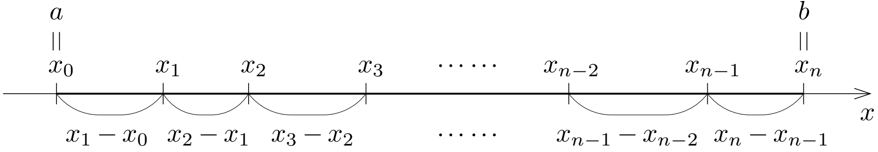
例えば次のようになる：

$$\max\{-2, 5, 3, -7\} = 5 \ , \qquad \max\left\{\frac{5}{6}, 3, \frac{9}{2}, \frac{7}{3}, 4\right\} = \frac{9}{2} \ .$$

実数 a,b について $a \leq b$ で，関数 f の定義域は区間 $[a,b]$ を含むとする．正の各自然数 n に対して，

$$a = x_0 \leq x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_{n-1} \leq x_n = b$$

である実数 $x_0, x_1, x_2, x_3, \ldots, x_{n-1}, x_n$ をとり，区間 $[a,b]$ を n 個の小区間 $[x_0,x_1]$，$[x_1,x_2]$，$[x_2,x_3]$，…，$[x_{n-1},x_n]$ に分割する．



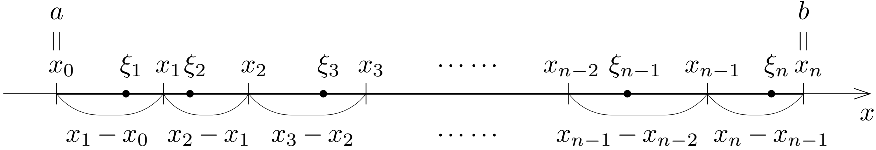
実数 a,b について $a \leq b$ で，関数 f の定義域は区間 $[a,b]$ を含むとする．正の各自然数 n に対して，

$$a = x_0 \leq x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_{n-1} \leq x_n = b$$

である実数 $x_0, x_1, x_2, x_3, \ldots, x_{n-1}, x_n$ をとり，区間 $[a,b]$ を n 個の小区間 $[x_0,x_1]$，$[x_1,x_2]$，$[x_2,x_3]$，…，$[x_{n-1},x_n]$ に分割する．更に，

$$x_0 \leq \xi_1 \leq x_1 \ , \ x_1 \leq \xi_2 \leq x_2 \ , \ x_2 \leq \xi_3 \leq x_3 \ , \ \cdots \ , \ x_{n-1} \leq \xi_n \leq x_n$$

である実数 $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \ldots, \xi_n$ をとる．ξ_k （ $k = 1, 2, 3, \ldots, n$ ）は小区間 $[x_{k-1}, x_k]$ から選ばれた実数である．



区間 $[x_0,x_1]$ の幅 x_1-x_0 , $[x_1,x_2]$ の幅 x_2-x_1 , $[x_2,x_3]$ の幅 x_3-x_2 , $\cdots$, $[x_{n-1},x_n]$ の幅 x_n-x_{n-1} , の中で最も大きいものを δ_n とおく：

$$\delta_n = \max\{x_1-x_0, x_2-x_1, x_3-x_2, \ldots, x_n-x_{n-1}\} .$$

区間 $[x_0,x_1]$ の幅 x_1-x_0，$[x_1,x_2]$ の幅 x_2-x_1，$[x_2,x_3]$ の幅 x_3-x_2，$\cdots$，$[x_{n-1},x_n]$ の幅 x_n-x_{n-1}，の中で最も大きいものを δ_n とおく：

$$\delta_n = \max\{x_1-x_0, x_2-x_1, x_3-x_2, \ldots, x_n-x_{n-1}\} .$$

また，各区間 $[x_{k-1},x_k]$（$k=1,2,3,\ldots,n$）の幅 x_k-x_{k-1} と関数 f の値 $f(\xi_k)$ との積 $f(\xi_k)(x_k-x_{k-1})$ の総和を S_n とおく：

$$\begin{aligned} S_n &= \sum_{k=1}^{n}\{f(\xi_k)(x_k-x_{k-1})\} \\ &= f(\xi_1)(x_1-x_0)+f(\xi_2)(x_2-x_1)+f(\xi_3)(x_3-x_2)+\cdots+f(\xi_n)(x_n-x_{n-1}) . \end{aligned}$$

正の各自然数 n に対する S_n の値を f のリーマン和という.

区間 $[x_0,x_1]$ の幅 x_1-x_0，$[x_1,x_2]$ の幅 x_2-x_1，$[x_2,x_3]$ の幅 x_3-x_2，$\cdots$，$[x_{n-1},x_n]$ の幅 x_n-x_{n-1}，の中で最も大きいものを δ_n とおく：

$$\delta_n = \max\{x_1-x_0, x_2-x_1, x_3-x_2, \ldots, x_n-x_{n-1}\} \ .$$

また，各区間 $[x_{k-1},x_k]$（ $k=1,2,3,\ldots,n$ ）の幅 x_k-x_{k-1} と関数 f の値 $f(\xi_k)$ との積 $f(\xi_k)(x_k-x_{k-1})$ の総和を S_n とおく：

$$\begin{aligned} S_n &= \sum_{k=1}^{n}\{f(\xi_k)(x_k-x_{k-1})\} \\ &= f(\xi_1)(x_1-x_0)+f(\xi_2)(x_2-x_1)+f(\xi_3)(x_3-x_2)+\cdots+f(\xi_n)(x_n-x_{n-1}) \ . \end{aligned}$$

正の各自然数 n に対する S_n の値を f のリーマン和という．変数 n の値に対して S_n の値を唯一つ定めるので，リーマン和 S_n は変数 n の関数である．

区間 $[x_0,x_1]$ の幅 x_1-x_0，$[x_1,x_2]$ の幅 x_2-x_1，$[x_2,x_3]$ の幅 x_3-x_2，$\cdots$，$[x_{n-1},x_n]$ の幅 x_n-x_{n-1}，の中で最も大きいものを δ_n とおく：

$$\delta_n = \max\{x_1-x_0, x_2-x_1, x_3-x_2, \ldots, x_n-x_{n-1}\} \ .$$

また，各区間 $[x_{k-1},x_k]$（ $k=1,2,3,\ldots,n$ ）の幅 x_k-x_{k-1} と関数 f の値 $f(\xi_k)$ との積 $f(\xi_k)(x_k-x_{k-1})$ の総和を S_n とおく：

$$\begin{aligned} S_n &= \sum_{k=1}^{n}\{f(\xi_k)(x_k-x_{k-1})\} \\ &= f(\xi_1)(x_1-x_0)+f(\xi_2)(x_2-x_1)+f(\xi_3)(x_3-x_2)+\cdots+f(\xi_n)(x_n-x_{n-1}) \ . \end{aligned}$$

正の各自然数 n に対する S_n の値を f のリーマン和という．変数 n の値に対して S_n の値を唯一つ定めるので，リーマン和 S_n は変数 n の関数である．実数 $x_1,x_2,x_3,\ldots,x_{n-1}$ 及び実数 $\xi_1,\xi_2,\xi_3,\ldots,\xi_n$ をどう定めるかによって様々なリーマン和ができる．

$n \to \infty$ のとき小区間 $[x_0, x_1], [x_1, x_2], [x_2, x_3], \ldots, [x_{n-1}, x_n]$ の幅は総て 0 に収束するとする；つまり $\lim_{n\to\infty} \delta_n = 0$ とする．

$n \to \infty$ のとき小区間 $[x_0, x_1], [x_1, x_2], [x_2, x_3], \ldots, [x_{n-1}, x_n]$ の幅は総て 0 に収束するとする；つまり $\lim_{n\to\infty} \delta_n = 0$ とする．$n \to \infty$ のときどのようなリーマン和 S_n も収束して，極限値 $\lim_{n\to\infty} S_n$ が関数 f 及び実数 a, b だけから唯一つに決まるとき，関数 f は a から b まで（定）積分可能であるといい，極限値 $\lim_{n\to\infty} S_n$ を a から b までの f の定積分といい，$\int_a^b f(x)\,dx$ と書き表す：

$$\int_a^b f(x)\,dx = \lim_{n\to\infty} S_n \ .$$

$n \to \infty$ のとき小区間 $[x_0, x_1], [x_1, x_2], [x_2, x_3], \ldots, [x_{n-1}, x_n]$ の幅は総て 0 に収束するとする；つまり $\lim_{n\to\infty} \delta_n = 0$ とする．$n \to \infty$ のときどのようなリーマン和 S_n も収束して，極限値 $\lim_{n\to\infty} S_n$ が関数 f 及び実数 a, b だけから唯一つに決まるとき，関数 f は a から b まで（定）積分可能であるといい，極限値 $\lim_{n\to\infty} S_n$ を a から b までの f の定積分といい，$\int_a^b f(x)\,dx$ と書き表す：

$$\int_a^b f(x)\,dx = \lim_{n\to\infty} S_n \ .$$

つまり，大雑把にいうと，関数 f の定積分とは f のリーマン和の極限値である．

改めて定積分の定義を述べる．この定義を理解して覚えること．

[定義] 実数 a と b とについて $a \leq b$ で，関数 f の定義域は区間 $[a,b]$ を含むとする．正の各自然数 n に対して，

$$a = x_0 \leq \xi_1 \leq x_1 \leq \xi_2 \leq x_2 \leq \xi_3 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_{n-1} \leq \xi_n \leq x_n = b$$

である実数 $x_0, x_1, x_2, x_3, \ldots, x_{n-1}, x_n$ 及び $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \ldots, \xi_n$ をとり，

$$\delta_n = \max\{x_1 - x_0, x_2 - x_1, x_3 - x_2, \ldots, x_n - x_{n-1}\} \ ,$$

$$S_n = \sum_{k=1}^{n} \{f(\xi_k)(x_k - x_{k-1})\}$$

と定める．変数 n の関数 S_n を f のリーマン和という． $\lim_{n\to\infty} \delta_n = 0$ であるどのようなリーマン和 S_n も $n \to \infty$ のとき収束して，極限値 $\lim_{n\to\infty} S_n$ が関数 f 及び実数 a, b だけから唯一つに決まるならば，関数 f は a から b まで（定）積分可能であるといい， f のリーマン和の極限値 $\lim_{n\to\infty} S_n$ を， a から b までの f の 定積分といい， $\int_a^b f(x)\,dx$ と書き表す： $\int_a^b f(x)\,dx = \lim_{n\to\infty} S_n$ ．

関数 f が a から b まで積分可能であるとき，関数 f は b から a まで積分可能であるといい，f の b から a までの定積分 $\int_b^a f(x)\,dx$ を次のように定義する： $\int_b^a f(x)\,dx = -\int_a^b f(x)\,dx$ ．

実数 a と b とに対して関数 f が a から b まで積分可能であるとき，a から b までの f の定積分 $\int_a^b f(x)\,dx$ を求めることを f を a から b まで（定）積分するという.

実数 a と b とに対して関数 f が a から b まで積分可能であるとき，a から b までの f の定積分 $\int_a^b f(x)\,dx$ を求めることを f を a から b まで（定）積分するという．また，定積分を表す式 $\int_a^b f(x)\,dx$ において，a を定積分の下端といい，b を定積分の上端といい，区間 $[a,b]$ を積分区間という；

実数 a と b とに対して関数 f が a から b まで積分可能であるとき，a から b までの f の定積分 $\int_a^b f(x)\,dx$ を求めることを f を a から b まで（定）積分するという．また，定積分を表す式 $\int_a^b f(x)\,dx$ において，a を定積分の下端といい，b を定積分の上端といい，区間 $[a,b]$ を積分区間という；更に，f を被積分関数といい，x を積分変数という．

[定理 6.1.1]　実数 a が関数 f の定義域に属すとき，

$$\int_a^a f(x)\,dx = 0 \ .$$

[定理 6.1.1]　実数 a が関数 f の定義域に属すとき，

$$\int_a^a f(x)\,dx = 0 \ .$$

　実数 a と b とについて，$a \leq b$ のとき，関数 f が a から b まで積分可能であるならば，定積分の定義より $\int_b^a f(x)\,dx = -\int_a^b f(x)\,dx$ ．次のことも導かれる：$a > b$ のとき，関数 f が b から a まで積分可能であるならば $\int_b^a f(x)\,dx = -\int_a^b f(x)\,dx$ ．

[定理 6.1.1]　実数 a が関数 f の定義域に属すとき，

$$\int_a^a f(x)\,dx = 0\ .$$

　実数 a と b とについて， $a \leq b$ のとき，関数 f が a から b まで積分可能であるならば，定積分の定義より $\int_b^a f(x)\,dx = -\int_a^b f(x)\,dx$ ．次のことも導かれる： $a > b$ のとき，関数 f が b から a まで積分可能であるならば $\int_b^a f(x)\,dx = -\int_a^b f(x)\,dx$ ．

[定理 6.1.2]　実数 a と b とに対して，関数 f が a から b まで積分可能であるとき，

$$\int_b^a f(x)\,dx = -\int_a^b f(x)\,dx\ .$$

関数は連続である範囲で積分可能である．

[定理 **6.1.3**]　実数 a と b とが属するある区間において関数 f が連続であるならば，f は a から b まで積分可能である．

　ある条件を満たすリーマン和の極限値が定積分である．

ある条件というのは次のことである： $a \leq b$ である実数 a, b と，定義域が区間 $[a,b]$ を含む関数 f と，正の各自然数 n に対して，

$$a = x_0 \leq \xi_1 \leq x_1 \leq \xi_2 \leq x_2 \leq \xi_3 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_{n-1} \leq \xi_n \leq x_n = b$$

である実数 $x_0, x_1, x_2, x_3, \ldots, x_{n-1}, x_n$ 及び $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \ldots, \xi_n$ を元にできる f のリーマン和 $S_n = \sum_{k=1}^{n} \{f(\xi_k)(x_k - x_{k-1})\}$ の極限値を考えるとき，

$$\delta_n = \max\{x_1 - x_0, x_2 - x_1, x_3 - x_2, \ldots, x_n - x_{n-1}\}$$

について $\lim_{n\to 0} \delta_n = 0$ ．

ある条件を満たすリーマン和の極限値が定積分である．前節で述べたように，座標平面における関数のグラフを境界線とする領域の面積は，この条件を満たすリーマン和の極限値で与えられる，つまり定積分で与えられる．

ある条件を満たすリーマン和の極限値が定積分である．前節で述べたように，座標平面における関数のグラフを境界線とする領域の面積は，この条件を満たすリーマン和の極限値で与えられる，つまり定積分で与えられる．

[定理 6.1.4]　実数 a, b について $a \leq b$ とする．関数 f は区間 $[a,b]$ において連続であり，区間 $[a,b]$ において $f(x) \geq 0$ とする．xy 座標平面において，$y = f(x)$ のグラフと x 軸と直線 $x = a$ と $x = b$ とで囲まれる領域の面積は $\int_a^b f(x)\,dx$ である．